
Modélisation d'un système complexe

Une méthode déclarative

Pierre Martin^{*,} — Pascal Clouvel^{**} — Philippe Reitz^{*} —
Thérèse Libourel^{*,***}**

** Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier
Université Montpellier II / CNRS - UMR 5506
161 rue Ada, F-34392 Montpellier Cedex 5
{pmartin, libourel, reitz}@lirmm.fr*

*** CIRAD - Unité Propre de Recherche Système cultures Annuelles
Avenue Agropolis, F-34398 Montpellier Cedex 5
{pierre.martin, pascal.clouvel}@cirad.fr*

**** UMR ESPACE-DEVS - Maison de la Télédétection
500 rue Jean-François Breton, F-34093 Montpellier cedex 5
{libourel}@lirmm.fr*

RÉSUMÉ. Dans le cadre de leurs travaux, les chercheurs peuvent être amenés à assembler des programmes de simulation préexistants. Le mode opératoire repose sur l'hypothèse que l'assemblage de programmes, chacun représentant un sous-système, permet d'accéder à la simulation du système global. Cette hypothèse n'est pas toujours vérifiée et la question se pose de l'identification des sous-systèmes manquants. La théorie du système général appréhende les systèmes sous la forme d'une collection d'actions enchevêtrées. L'objet de ce document est de présenter une méthode déclarative de description de système complexe reposant sur cette théorie et d'en montrer une application à un système biologique.

ABSTRACT. As part of their work, researchers may need to assemble pre-existing simulation programs. The procedure assumes that the combination of programs, each representing a subsystem, provides access to the simulation of the global system. This assumption is not always true and the question arises of identifying the missing subsystems. General system theory apprehends systems as a collection of tangled actions. The purpose of this paper is to present a declarative method for describing complex system based on this theory and to show an application to a biological system.

MOTS-CLÉS : linguistique, action, réseau sémantique, système, programme, simulation

KEYWORDS: linguistic, action, semantic network, system, program, simulation

Thématique : Innovations en systèmes d'information pour l'environnement

1. Introduction

Les systèmes biologiques considérés par les sciences de l'environnement (génétique, agronomie, écologie etc.) sont pour la plupart des systèmes complexes. Depuis les années 1960, l'informatique permet de représenter ces systèmes sous forme de programmes, et d'en reproduire artificiellement le fonctionnement par la simulation. Dans le cadre de leurs travaux, les chercheurs peuvent être amenés à assembler des programmes de simulation existants. Dans le projet SEAMLESS par exemple (Brouwer and Ittersum, 2010), l'assemblage de programmes redevables de l'agronomie et de l'économie permet d'estimer l'impact des politiques agricoles européennes sur l'agriculture et l'environnement. L'hypothèse sous-jacente à cette construction consiste à admettre que l'assemblage de programmes de simulation, pris isolément comme la représentation d'un sous-système, permet d'accéder à la simulation du système global (Martin, 2010).

Le cadre théorique de représentation des connaissances généralement adopté pour la conception des programmes de simulation est la théorie des systèmes (Bertalanffy, 1968). Dans ce cadre, le fonctionnement du système est décrit en exprimant les processus biophysiques qui le composent sous forme d'équations aux dérivées partielles. La théorie permet en outre d'appréhender le système sous la forme d'un ensemble de sous-systèmes en interaction, selon une structure dite 'gigogne'. Le fonctionnement de chaque sous-système est décrit de la même façon que le système au travers des processus. L'interaction est matérialisée par la transmission d'informations entre sous-systèmes (Klir et valach, 1965).

Dans la mesure où les programmes à assembler ont été conçus indépendamment de l'objectif d'assemblage, il se peut que les sous-systèmes préexistants ne suffisent pas à représenter le système global. La question appliquée que nous abordons ici est celle d'une méthode pour identifier les sous-systèmes manquant et développer les programmes correspondants.

Pour traiter de la question, nous proposons d'utiliser les travaux de Le Moigne (1999). Cet auteur inscrit la théorie des systèmes au sein d'un cadre conceptuel appelé « théorie du système général ». Dans cette théorie, le système observé est appréhendé sous la forme d'une collection d'actions enchevêtrées, la notion de processus étant conceptualisée par celle d'action. Si le processus est une construction formelle exprimée au moyen du langage mathématique (équation différentielle) dans les référentiels « Temps – Espace – Forme », la description de l'action pour sa part s'énonce dans le langage naturel en réponse à la question « qu'est-ce que ça fait ? ». Bien que cette théorie repose sur la notion d'action, aucun cadre formel de description d'une action n'est proposé (Larsen-Freeman and Cameron, 2008). Un modèle de transcription de l'énoncé littéral de l'action sous forme de processus ne peut donc pas être proposé. L'identification d'une structure formelle de description de l'action pose donc une question théorique pour répondre à la question pratique que nous nous posons.

L'objet de ce document est (i) de présenter une méthode déclarative de description de système complexe et (ii) de l'appliquer à l'assemblage de trois programmes de simulation. L'exemple choisi pour illustrer la méthode est celui du système biologique « vigne – bioagresseurs » au sein duquel s'observe une relation mutualiste entre un insecte *Lobesia botrana* et un champignon *Botrytis Cinerea* (Mondy and Corio-Costet, 2000 ; Clouvel et al., 2008).

Pour établir la méthode déclarative, nous mobilisons les travaux de deux disciplines : (i) la linguistique pour établir la structure formelle de description de l'action (chapitre 2), et (ii) les réseaux sémantiques pour accéder à l'enchevêtrement d'actions (chapitre 3). Le chapitre 4 établit le lien entre réseau sémantique et implémentation logicielle, en utilisant le système biologique en tant que support d'illustration. Pour des questions de place, la partie mathématique support de la méthode n'est pas montrée.

2. L'action

Selon Le Moigne (1999), renseigner une action s'effectue en répondant à la question « qu'est-ce que ça fait ? ». Dans notre approche, le questionnement est utilisé pour accéder aux descripteurs de l'action.

2.1. Le rôle du questionnement

Parmi les trois types d'interrogation permis par la langue française, le type partiel permet de renseigner sur l'inconnu. Celui-ci porte sur un membre précis de l'énoncé et requiert en réponse un ensemble de mots formant une seule unité, le groupe fonctionnel. En mode direct, l'interrogation partielle se construit en remplaçant le groupe fonctionnel inconnu par un terme dont la sémantique est partagée par tous les interlocuteurs et appelle une réponse spécifique (Kerbrat-Orecchioni, 2001). Par exemple, à la question « Où es tu ? », le groupe fonctionnel énoncé dans la réponse peut être « à la maison ».

Sept mots, pronoms ou adverbes, sont employés en Français, qui suffisent à 'questionner le monde' (Gosselin, 1990). Les adverbes « Où », « Quand », « Comment », et « Pourquoi » requièrent respectivement en réponse un complément circonstanciel de localisation, de temporalité, de manière ou de raison (Gosselin, 1990). Le pronom « Qui » interroge sur l'identité, la détermination d'une personne (TLFi, 2009). Le pronom « Que » interroge sur quelque chose situé en complément d'objet direct ou attribut (Larousse, 2003). Le pronom « Quoi » interroge sur la nature, la détermination de quelque chose (Larousse, 2003).

2.2. Actance et syntaxe

Dans l'énoncé obtenu en réponse à « qu'est ce que ça fait ? », les adverbes renseignent précisément la nature de l'information contenue dans le groupe fonctionnel, i.e. une circonstance de déroulement de l'action. La réponse aux pronoms interrogatifs par contre est moins précise vis-à-vis de l'action. Il n'existe par exemple pas de pronom pour renseigner le verbe « fait ».

Dans le cadre de la syntaxe structurale, Tesnière (1988) appréhende le verbe comme le descripteur d'un état ou d'une action. Le verbe d'état exprime une manière d'être, caractérisée par une qualité ou une position, et le verbe d'action un acte. Le verbe est qualifié selon le nombre d'actants qui lui sont adjoints, appelé la valence. Par ailleurs, Lazard (1994) analyse les constructions syntaxiques comportant zéro, un, deux ou trois actants. Dans son analyse, l'auteur oppose l'agent, celui qui agit, à l'objet, « correspondant au patient dans les phrases d'action et à ceux qui sont traités de même dans les autres types de phrases ». Dans les constructions tri-actanciennes (valence de valeur trois), comme par exemple, 'il lui donne la pomme', 'lui' est considéré comme un agent périphérique (complément de direction). Ce formalisme conduit à appréhender une construction tri-actancielle sous une forme bi-actancielle. Dans les constructions sans actant ('il pleut'), l'actant ('il') ne peut être explicité par aucun substantif, et est donc dépourvu de contenu sémantique. Il est alors qualifié de « vide » et la construction est décrite comme uni-actancielle.

Ce faisant, deux types d'actants accompagnent le verbe, i.e. l'agent et l'objet. Pour décrire l'action, nous avons postulé que ces entités pouvaient être appréhendés sous forme de groupe fonctionnel : le groupe fonctionnel Agent comporte l'ensemble des agents impliqués dans l'action, y compris l'agent périphérique, le groupe fonctionnel Acte comporte le verbe, et le groupe fonctionnel Objet l'objet de l'action. Au total, sept groupes fonctionnels suffisent donc à décrire l'action : Agent, Acte, Objet, Localisation, Temporalité, Manière et Raison.

2.3. Organisation relative des groupes fonctionnels

Différentes notions de grammaires président à l'assemblage des groupes fonctionnels. Le principe d'incidence, énoncé par Guillaume (1973), met en rapport au sein de la phrase le support, qui est ce dont on parle, de l'apport, qui est ce qui est dit. Ce principe formalise d'une manière prédictive le mécanisme établissant les liens entre les mots au sein de la phrase. Appliqué aux groupes fonctionnels, ce principe appréhende (i) l'Agent comme l'élément support de l'action, complété par les autres éléments (les apports), (ii) l'Acte comme incident à l'Agent et (iii) les circonstants comme incidents à l'Acte. Dans le cas d'une construction bi-actancielle, l'Objet est incident à l'Acte, au même titre que les circonstants. L'adoption de ce principe conduit à renseigner les groupes fonctionnels d'Agent, d'Acte, d'Objet, de

Localisation, de Temporalité, de Manière et de Raison respectivement en réponse aux questions « Qui ? », « Qui fait quoi ? », « Que fait qui ? », « Où est fait quoi par qui ? », « Quand est fait quoi par qui ? », « Comment est fait quoi par qui ? », et « Pourquoi est fait quoi par qui ? ». A titre d'illustration, dans la phrase « la larve consomme les stérols de la vigne », 'Larve', 'Consommation' et 'Stérol de la vigne' correspondent respectivement à l'Agent, l'Acte et l'Objet.

Par ailleurs, El Hasnaoui (2008) distingue deux constructions syntaxiques selon que le circonstant est incident au verbe ou au sujet de la phrase. Vis-à-vis des groupes fonctionnels, ces deux constructions syntaxiques permettent de différencier l'acte « Série » commis par un Agent sur un Objet, comme 'enfoncer un clou avec un marteau', de l'Acte « Parallèle » commis par un Agent sur deux Objets simultanément, comme par exemple 'il travaille en chantant'.

2.4. Structure de description du groupe fonctionnel

D'après Robert Martin (2002), la langue « repose sur le principe de classification et de hiérarchie ». Ce principe conduit à proposer une structure de description des groupes fonctionnels. Une étude comparative des structures de description disponibles dans la littérature permet à P. Martin (2010) d'en identifier des traits communs. P. Martin (2010) distingue les éléments informatifs, la situation relative de ces éléments informatifs en regard d'un référentiel, et le sens effectivement véhiculé par les éléments informatifs. Trois classes sont ainsi proposées, appelées respectivement Information (CI), Référentiel (CR) et Sémantique (CS).

Des structures d'organisation des classes sont proposées dans la littérature. Pour CI, Martin (2010) identifie une structure commune à tous les groupes fonctionnels. La structure différencie l'élément permanent de la chaîne d'éléments, cette dernière étant appréhendée selon une séquence : initial, médian (dont la longueur varie de 0 à n, et $n > 0$), et final. A titre d'illustration, les notions de déplacement (Hadermann, 1993) et de temporalité (Declerck, 1997) composent respectivement les chaînes de lieu « initial/médian/final » et de durée « début/en cours/fin ».

Pour CS, Martin (2010) observe une récurrence du caractère discriminant intrinsèque/extrinsèque dans les diverses typologies recensées. Pour la localisation, par exemple, Hadermann (1993) distingue le lieu dont la sémantique est propre à lui-même (intrinsèque), tel que le toponyme, du lieu dont la sémantique découle des autres lieux (extrinsèque), tel que l'élément topologique. Pour la Temporalité, Grenier (2001) différencie le temps historique (extrinsèque), du temps physique correspondant à un système de mesure du temps universel auto-signifiant (intrinsèque).

Pour CR, les typologies ne sont pas toutes disponibles dans la littérature. A partir des typologies disponibles, Martin (2010) n'est pas parvenu à mettre en évidence une organisation commune. Pour continuer sur la localisation, Hadermann (1993)

s'intéresse au référentiel dans le cas d'une pluralité de localisation et s'interroge sur le lien existant entre ces lieux. Le référent étant le lieu dont on parle, le référentiel est le lieu qui permet de situer le référent. Deux relations sont décrites, à savoir l'inclusion et le voisinage. L'inclusion correspond à la relation contenant/contenu, et s'explique en énonçant le contenant. Le voisinage requiert la spécification (i) des éléments voisins composant le référentiel et (ii) des liens entre le référent et les éléments du référentiel ('la maison située au bord de la mer' par exemple).

Dans l'exemple « les larves (de l'insecte) acheminent les conidies (champignon) dans les grains de raisin de la vigne, dont elles se nourrissent », l'Agent, l'Acte et l'Objet sont respectivement « les larves », « acheminement », et « les conidies ». A la question de la localisation de l'acte de transport produit par les chenilles, la réponse est « dans les grains de raisin de la vigne, dont elles se nourrissent ». Au sein du Groupe fonctionnel de Localisation, l'élément informatif est « les grains de raisin », le référentiel est « la vigne », et la sémantique est « dont elles se nourrissent », c'est-à-dire un aliment.

De part l'utilisation du principe d'incidence, la différenciation intrinsèque/extrinsèque au sein d'une CS s'effectue en regard de l'Agent. La posture de support confère à l'Agent « les larves » le caractère intrinsèque vis-à-vis de lui-même. Dans la mesure où l'Acte est redevable de l'Agent, l'Acte « acheminement » est intrinsèque à l'Agent. Par contre, « les conidies » et « les grains de raisin » sont extérieurs à « les larves ». Ce faisant, Objet et Localisation sont extrinsèques à l'Agent.

3. L'enchevêtrement d'actions

La formalisation de l'action sous forme de graphe sémantique permet d'appréhender l'enchevêtrement d'actions sous la forme d'un réseau sémantique. L'objet de ce chapitre est de présenter la structure du graphe sémantique et la méthodologie d'enchevêtrement des actions.

3.1. Représentation de l'action sous forme de graphe

La méthode des réseaux sémantiques (Schreiber, 2008) est un langage formel permettant la représentation de connaissances exprimées sous forme littérale et le raisonnement sur ces connaissances. Dans ce travail, « toute connaissance est une action conduite par celui qui connaît » (Maturana et Varela, 1987). La structure de description de l'action identifiée par composition de travaux de linguistique conduit à proposer trois graphes, chacun correspondant à une des classes. Ces trois graphes sont organisés selon le principe d'incidence (Guillaume 1973).

Le graphe d'Information est obtenu par composition des classes Information des sept groupes fonctionnels. L'implémentation de l'incidence s'effectue au moyen de

la relation de composition 'Has a' ('possède' en français) depuis l'Agent vers les autres groupes fonctionnels : l'Agent 'possède' un Acte, l'Acte 'possédant' à son tour un Objet, une Localisation, une Temporalité, une Manière et une Raison (figure 1a).

Le graphe Sémantique est obtenu par composition des classes Sémantique des sept groupes fonctionnels (figure 1b). L'implémentation de l'incidence s'effectue au moyen de la relation de généralisation 'Is a' ('est un' en français). Cette composition donne lieu à la généralisation de tous les termes du vocabulaire de l'action par une racine commune, appelée ici 'Terme du vocabulaire' (figure 1b).

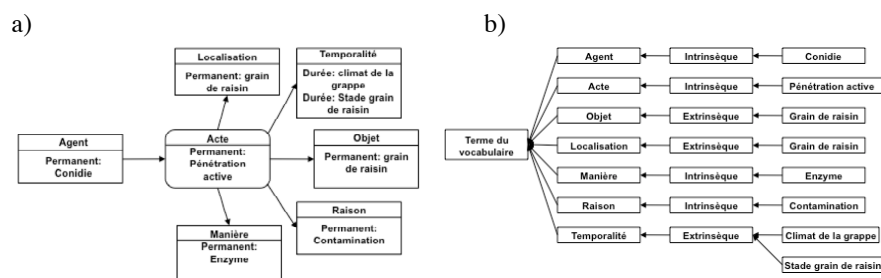


Figure 1. Exemple de représentation sous forme de graphes sémantiques de l'action : 'Conidie' 'Pénétration active' 'grain de raisin', selon 'grain de raisin' 'Climat de la grappe' & 'Stade grain de raisin' 'Enzyme', et 'Contamination', correspondant respectivement à l'Agent Acte un Objet selon une Localisation, une Temporalité, une Manière et une Raison. Les graphes (a) et (b) représentent respectivement le graphe d'Information et le graphe Sémantique afférents à l'action. Pour (a), les flèches implémentent la composition 'has a', et pour (b) la relation de généralisation 'Is a'.

Concernant le graphe de Référentiel, s'obtenant par composition des classes Référentiel des sept groupes fonctionnels, une construction générique est difficile à proposer. En effet, alors que pour les graphes précédents les relations 'Has a' et 'Is a' s'appliquent à l'ensemble des groupes fonctionnels, ce n'est pas le cas pour le Référentiel. La relation dépend de la nature des référentiels à relier entre Agent et Acte et entre Acte et tous les autres groupes fonctionnels.

Le graphe d'Action enfin, correspondant à la représentation formelle d'une action, s'obtient par la composition des graphes d'Information, de Sémantique et de Référentiel. Vis-à-vis de l'étude présentée dans ce document, et pour faciliter la compréhension de la méthode, le graphe d'Action est réduit à la composition des graphes d'Information et Sémantique. Cette composition s'effectue par projection des éléments du graphe d'Information sur le graphe Sémantique (figure 2a).

3.2. Règle d'enchevêtrement des graphes

L'enchevêtrement d'actions s'effectue par composition des graphes établis pour chaque action. Le graphe Sémantique afférent à l'enchevêtrement est obtenu par agrégation successive des graphes Sémantiques des actions, et ceci pour chacun des groupes fonctionnels. Dans le cas où le terme à agréger est déjà présent dans le graphe, la question se pose de l'identité sémantique. Si celle-ci est avérée, alors le terme déjà présent suffit. Si l'identité n'est pas vérifiée, alors un concept est introduit pour préciser le sens de chacun, selon une relation de généralisation. L'opération de généralisation permet de lever l'ambiguïté sémantique. Dans le cas où le terme agrégé est nouveau, celui-ci est inséré dans le graphe sans autre modification. Toutefois dans le but d'organiser les termes les uns par rapport aux autres ou afin d'en préciser le sens si celui n'apparaît pas clairement, des concepts peuvent être introduits, et ceci toujours selon une relation de généralisation. Cette situation correspond à résoudre les questions de polysémie voire de polyphonie de certains termes.

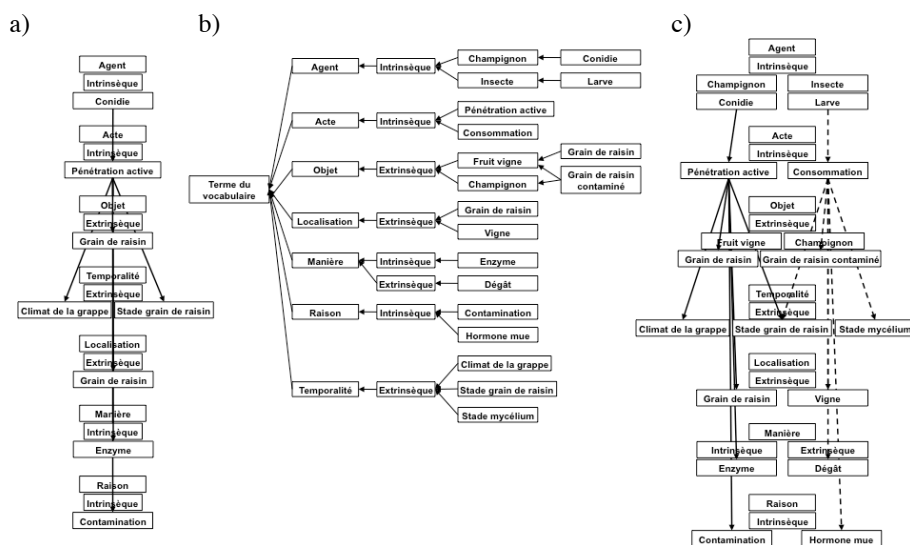


Figure 2. Enchevêtrement de l'action 1 ('Conidie' 'Pénétration active' 'Grain de raisin', selon 'Grain de raisin', 'Climat de la grappe' & 'Stade grain de raisin', 'Enzyme' et 'Contamination') et de l'action 2 ('Larve' 'Consommation' 'Grain de raisin contaminé' selon 'Vigne', 'Stade grain de raisin' & 'Stade mycelium', 'Dégât' et 'Hormone mue'). (a) Graphe d'Action de l'action 1, (b) graphe Sémantique relatif à l'enchevêtrement des actions 1 et 2 et (c) graphe d'Action de l'enchevêtrement des actions 1 et 2. Pour (a) et (c), les flèches pleines et pointillées correspondent respectivement aux actions 1 et 2. Pour faciliter la lecture de (a) et de (c), la relation de généralisation 'Is a' entre les éléments du vocabulaire n'est pas affichée.

3.3. Traitement sémantique de l'enchevêtrement

La figure 2b présente le graphe Sémantique résultant de l'enchevêtrement de deux actions, l'action 1 présentée en figure 1, et une autre (action 2) correspondant à « 'Larve' 'Consommation' 'Grain de raisin contaminé' 'Vigne' 'stade grain de raisin' & 'Stade mycélium' 'Dégât' et 'Hormone mue' ». Par rapport au graphe Sémantique de l'action 1 (figure 1b), Acte, Temporalité, Localisation, Manière et Raison sont actualisés par simple agrégation de termes. Pour l'Agent, les concepts 'Champignon' et 'Insecte' sont respectivement insérés en généralisation des termes 'conidie' et 'Larve' afin de lever le caractère implicite des termes. Il en est de même pour l'Objet, où le concept 'fruit vigne' a été inséré en généralisation du terme 'Grain de raisin'. Ce concept utilisé en complément du concept 'Champignon' concourt à définir le sens du terme 'grain de raisin contaminé'. La figure 2c présente le graphe d'Action correspondant à l'enchevêtrement des actions 1 et 2. Celui-ci est obtenu par composition des graphes d'Information et du graphe Sémantique (figure 2b) selon la procédure formulée plus haut au sujet de l'action unitaire (figure 2a).

4. Mise en œuvre de la démarche sur le système biologique

4.1. Le système biologique

A partir de Mondy and Corio-Costet (2000) et Clouvel et al (2008), neuf actions suffisent à décrire le système biologique. Le graphe Sémantique, comportant l'ensemble des termes et concepts utilisés, livre un panorama terminologique du système représenté. Le graphe Sémantique établi comporte cent huit termes et concepts, avec un maximum de cinq niveaux de généralisation.

Le graphe Sémantique d'Agent (figure 3) comporte cinq niveaux de généralisation, et différencie les bioagresseurs 'Conidie', 'Mycelium' et 'Larve' de l'organisme 'Grain de raisin'.

Le graphe sémantique d'Acte (figure 4) comporte 2 niveaux de généralisation. Il comporte six actes 'Fabrication', 'Transformation', 'Pénétration active', 'Pénétration passive', 'Transport' et 'Consommation'. Ce graphe ne comporte pas de concept intermédiaire entre les termes et la qualification d'Acte Intrinsèque vs. Extrinsèque. Le graphe sémantique d'Objet (figure 5) comporte cinq niveaux de généralisation. Les Objets 'Intrinsèques', i.e. 'Stérol', 'Mycelium' et 'Chrysalide', diffère des objets 'Extrinsèques', que sont 'Conidie', 'Grain de raisin' et 'Grain de raisin contaminé'. Par contre, certains concepts sont présents à deux reprises au sein de ce graphe, à l'exemple de 'Organisme' et de 'Champignon'. Dans la mesure où les concepts situés en amont au sein de l'arborescence sont identiques, la sémantique afférente à chacun de ces concepts l'est également.

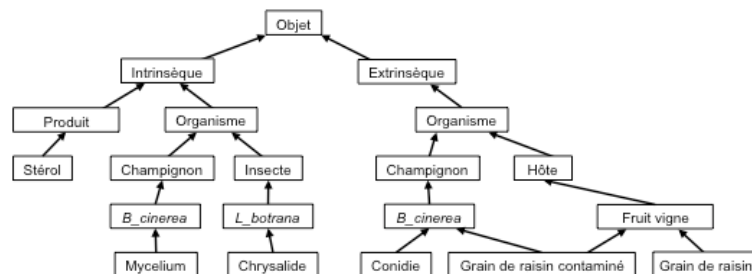


Figure 3. Graphe sémantique de l'Agent pour les neuf actions redevables du système biologique « vigne – bioagresseurs » au sein duquel s'observe une relation mutualiste entre un insecte *Lobesia botrana* et un champignon *Botrytis Cinerea*.

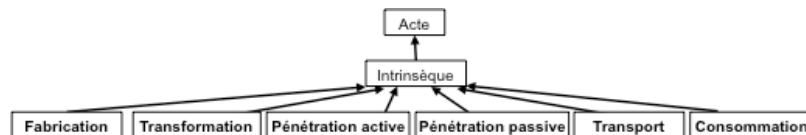


Figure 4. Graphe sémantique de l'Acte pour les neuf actions redevables du système biologique « vigne – bioagresseurs » au sein duquel s'observe une relation mutualiste entre un insecte *Lobesia botrana* et un champignon *Botrytis Cinerea*.

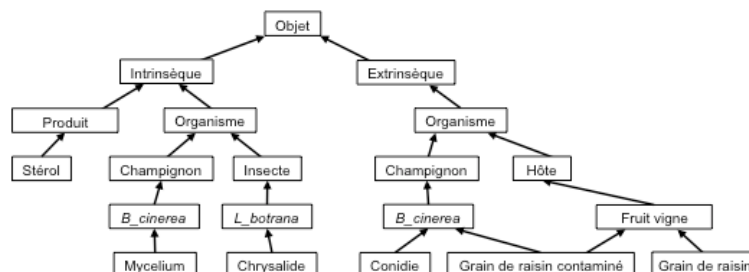


Figure 5. Graphe sémantique de l'Objet pour les neuf actions redevables du système biologique « vigne – bioagresseurs » au sein duquel s'observe une relation mutualiste entre un insecte *Lobesia botrana* et un champignon *Botrytis Cinerea*.

Le graphe sémantique de Temporalité (figure 6) comporte quatre niveaux de généralisation. On constate par exemple que 'stade grain de raisin' se situe à deux reprises dans le graphe. Dans l'arborescence 'Intrinsèque', il est un concept généralisant les termes d'état cuticule et de 'composition chimique' alors qu'en extrinsèque, il est un terme redevable du 'cycle de développement' de la vigne. La sémantique associée à 'stade grain de raisin' » diffère donc suivant la position dans l'arborescence. Dans ce graphe, le terme 'Stade mycélium' apparaît par deux fois.

Côté ‘intrinsèque’, ce terme fait référence à la biologie, tandis que du côté ‘Extrinsèque’, il fait référence au ‘cycle de développement’ du champignon’. Faute de place, les graphes Sémantiques relatifs aux autres groupes fonctionnels ne sont pas montrés.

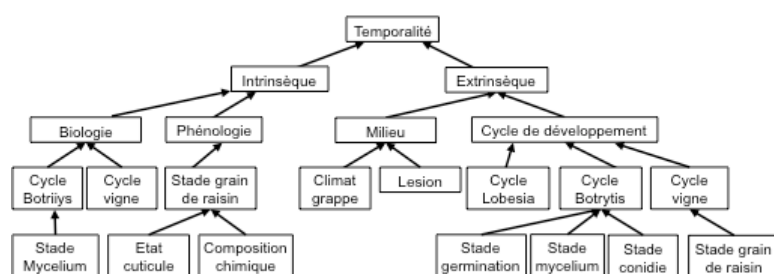


Figure 6. Graphe sémantique de l'Objet pour les neuf actions redevables du système biologique « vigne – bioagresseurs » au sein duquel s'observe une relation mutualiste

La figure 7 présente le graphe d'action correspondant à l'enchevêtrement des neuf actions. Les Agents 'Grain de raisin' et 'Mycelium' produisent une action chacun, 'Conidie' en produit trois et 'Larve' quatre. 'Grain de raisin' et 'Conidie' produisent un même acte sur un même Objet, i.e. la 'Fabrication' de 'Stérol' en tant que 'produit' 'Intrinsèque'. 'Conidie' produit deux actes différents, sur l'Objet 'Grain de raisin', 'pénétration passive' et 'pénétration active' en l'occurrence. Cette différence se retrouve dans la manière de pénétrer, respectivement via des 'lésions' et au moyen d'une 'Enzyme'.

4.2. Représentation systémique du système biologique

Selon la théorie du système général (Le Moigne, 1999), l'enchevêtrement d'actions modélise le fonctionnement du système biologique. Le découpage du système biologique selon la structure gigogne adopté dans ce travail est celui de trois sous-systèmes en interaction, un organisme autotrophe la vigne et deux organismes hétérotrophes la chenille et le champignon. Chaque action conceptualisant un processus, i.e. une fonction de transformation du système, l'inscription des processus au sein de ce découpage renseigne le fonctionnement du système biologique.

Chaque processus est décrit en utilisant les descripteurs de l'action qu'il implémente. Ainsi, l'Agent de l'action indique le sous-système opérateur de la transformation. La relation entre Agent et sous-système est la relation d'inclusion du premier en regard du second. Par exemple, les Agents 'Conidie' et 'Mycélium' (figure 3) sont redevables du sous-système 'Champignon', l'Agent 'Larve' du sous-système 'Chenille' et l'Agent 'Grain de raisin' du sous-système 'Vigne'.

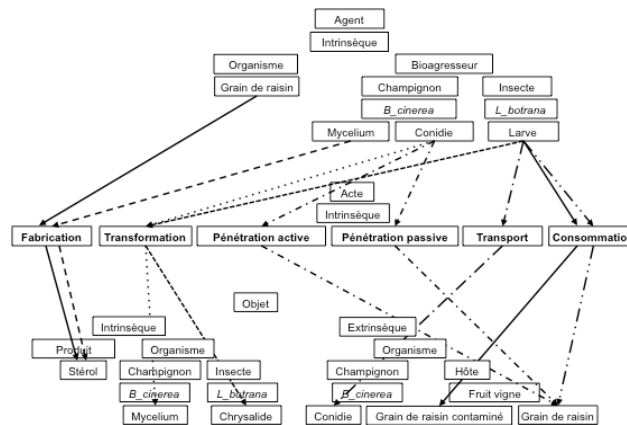


Figure 7. Graphe d'Action pour les neuf actions du système biologique « vigne – bioagresseurs » au sein duquel s'observe une relation mutualiste entre un insecte *Lobesia botrana* et un champignon *Botrytis cinerea*. A chaque action est associé un format de trait. Pour faciliter la lecture du graphe, seuls les Agents, Actes et Objets sont présentés, et la relation de généralisation 'Is a' entre les éléments du vocabulaire n'est pas affichée.

L'Objet de l'action indique le sous-système transformé. La caractérisation intrinsèque ou extrinsèque de l'Objet dans le graphe sémantique d'Objet indique si celui-ci est redevable ou non du même sous-système que l'Agent. Par exemple l'Objet 'Stérol' est intrinsèque dans le graphe sémantique de l'Objet (figure 5). Pour autant, il est fabriqué par deux Agents distincts, i.e. 'Grain de raisin' et 'Mycélium' (figure 7). Deux sous-systèmes fabriquent donc du 'Stérol' pour eux-mêmes, i.e. 'Vigne' et 'Champignon'. Par ailleurs, l'Objet 'Grain de raisin contaminé' est extrinsèque à l'Agent 'Larve'. Cet Objet résulte de la réunion des concepts 'Fruit vigne' et 'B_cinerea', respectivement redevables des sous-systèmes 'Vigne' et 'Champignon'.

Enfin, l'Acte indique la transformation effectuée par l'Agent sur l'Objet. Trois types d'interrelation se distinguent selon les liens tissés entre les sous-systèmes : celle produite par un sous-système sur lui-même, à l'exemple de 'Fabrication' du sous-système 'Vigne', celle produite par un sous-système sur un autre, à l'exemple de 'Pénétration active' du sous-système 'Champignon' sur le sous-système 'Vigne' (action 1 présentée en figure 1 et 2a), et celle produite par un sous-système sur deux autres simultanément, à l'exemple de 'Consommation' du sous-système 'Chenille' sur les sous-systèmes 'Vigne' et 'Champignon', pour les grains de raisin contaminés (action 2 présentée en figure 2). Ces types d'interrelation sont appelées respectivement la rétroaction, l'action série et l'action parallèle (Le Moigne, 1999). La figure 8 présente l'enchevêtrement des neuf actions entre les trois sous-systèmes.

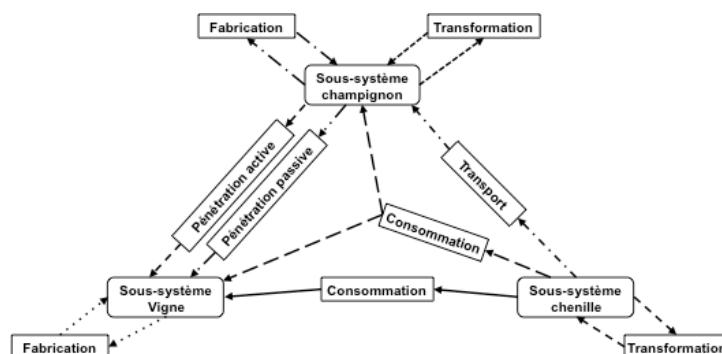


Figure 8. Représentation systémique du système biologique « vigne – bioagresseurs » par enchevêtrement des neuf actions entre les sous-systèmes 'Vigne', 'Champignon' et 'Chenille'. Dans ce graphe, sous-système et processus sont respectivement représentés par un rectangle à angles arrondis et un rectangle droit.

4.2. Implémentation logicielle

La transcription des processus sous forme d'équations aux dérivées partielles permet de reproduire le fonctionnement du système biologique. Le graphe d'Information indique les variables utiles à la formulation de chacune. Pour l'action 1 par exemple (figures 1), l'Agent 'Conidie', l'Objet 'grain de raisin', la Localisation 'grain de raisin', la Temporalité résultant de la combinaison de 'climat de la grappe' avec 'Stade grain de raisin', la Manière 'Enzyme' et la Raison 'Contamination' constituent les variables de l'équation mathématique relative à l'Acte de 'Pénétration active' du 'sous-système Champignon' sur le 'sous système Vigne'. Parmi ces variables, celles relatives à l'Agent et à l'Objet indiquent les sous-systèmes dont les variables d'état sont susceptibles d'être altérées par l'usage de cette équation. Pour l'action 1, il s'agit en l'occurrence des sous-systèmes 'Champignon' et 'Vigne'. Les autres variables correspondent à des données d'entrées utilisées uniquement à des fins de calcul.

Le graphe sémantique indique l'origine de la donnée susceptible d'alimenter la variable en entrée. Une variable 'intrinsèque' à l'Action indique la présence de la donnée au sein du sous-système. C'est le cas de 'l'Enzyme' pour l'action 1 (Manière), produite par le champignon et utilisée pour pénétrer le grain de raisin. Pour une variable 'extrinsèque' à l'action, la donnée se situe dans un sous-système tiers. C'est le cas par exemple du 'climat de la grappe', qui spécifie partiellement les circonstances temporelles de réalisation de l'action 1, qui s'exprime en terme de température et d'humidité. Pour la simulation du fonctionnement du système

biologique, l'obtention d'une donnée extrinsèque conditionne la réalisation de l'intégration numérique.

L'implémentation logicielle du système biologique respecte le découpage en sous-systèmes selon la structure gigogne. Dans le cas d'un assemblage de programmes de simulation préexistants, par exemple, chaque programme doit être afférent à un sous-système. La présence de concepts au sein du graphe Sémantique précise le sens des variables au sein de l'équation de l'action. Cette sémantique indique également celle des données instances des variables procurées par les programmes réutilisés. Pour que l'assemblage des programmes représente le système biologique dans son intégralité, les neuf processus doivent être insérés. Différentes stratégies d'insertion sont possibles, depuis l'intégration de chacun au sein du programme duquel il est redevable, i.e. en tant qu'Agent de l'action, jusqu'au développement de programmes supplémentaires. Cette dernière option permet de dissocier la version initiale des programmes de celle retravaillée à l'aune de son intégration dans un système plus global.

5. Conclusion

L'utilisation de l'interrogation partielle pour décrire l'action confère un cadre structurant au questionnement « qu'est ce que ça fait ? » proposée par Le Moigne. La structure de description résultante comporte sept descripteurs - les groupes fonctionnels d'Agent, d'Acte, d'Objet, de Localisation, de Temporalité, de Manière, et de Raison - reliés au moyen du principe d'incidence. La représentation de cette structure sous forme de réseau sémantique permet d'appréhender l'enchevêtrement d'actions via l'établissement d'un vocabulaire commun aux actions. L'inscription des actions en regard des sous-systèmes représentatifs du fonctionnement du système biologique permet d'identifier les éléments à mettre en place, depuis l'insertion de processus au sein de programmes existants jusqu'au développement de programmes spécifiques, pour accéder in fine à la simulation du système global.

Ce travail a pour ambition d'établir le lien entre l'énoncé littéral de l'action et sa formalisation sous forme d'équation numérique. Le graphe d'Information indique les variables de l'équation, et le graphe Sémantique la sémantique des variables. La prise en compte du graphe de Référentiel permettra d'accéder à la forme finale de l'équation (non montré).

6. Travaux sur le sujet

La structure de réseau sémantique développé dans ce travail utilise certains fondamentaux des méthodes usuelles, à l'exemple de la notion de concept et des relations de généralisation et composition. La notion de relation sémantique par contre diffère. Pour les graphes conceptuels (Chein et Mugnier, 2008) par exemple,

le nombre de concepts associés par une relation sémantique, appelé arité de la relation, est indiqué par la valence du verbe inscrit dans la relation. Par conséquent, la structure du 'graphe de fait' de cette méthode diffère du graphe d'action présenté ici. Pour les deux méthodes, les termes et concepts sont reliés au moyen de la relation de généralisation. Une première différence concerne la catégorisation en groupe fonctionnel des concepts, ainsi que la possibilité de définir plusieurs sémantiques pour un même concept. La méthode proposée ici permet donc de lever les questions de polysémie et de polyphonie.

L'implémentation de l'enchevêtrement correspond à une forme particulière de programmation, celle de l'exécution de processus exécutés indépendamment les uns des autres. Cette méthode, issue de la théorie des systèmes, est utilisée par le formalisme DEVS (Ziegler et al. 2000). Celui-ci permet l'intégration numérique dans l'espace et le temps. Il est implémentée par diverses plateformes de modélisation à l'exemple de VLE (Quesnel et al., 2009) pour permettre la simulation multi-agents. L'expression de DEVS au moyen d'UML a été initiée (Risco-Martín et al., 2009). La limite principale d'UML concerne l'absence de prise en compte de l'espace dans la modélisation, pourtant essentielles pour les sciences de l'environnement.

7. Bibliographie

- Bertalanffy L. von, *General System theory: Foundations, Development, Applications*, George Braziller, New York, 1968.
- Brouwer F.M., Ittersum M.v., *Environmental & agricultural modelling: integrated approaches for policy impact assessment*, Springer, Paris, 2010.
- Chein M., Mugnier M.L., *Graph-Based Knowledge Representation - Computational Foundations of Conceptual Graphs*, Springer-Verlag, London, 2008.
- Clouvel P., Bonvarlet L., Martinez A., Lagouarde P., Dieng I., Martin P., Wine contamination by Ochratoxin A in relation to vine environment, *International Journal of Food Microbiology*, vol. 123, n°1, 2008, p. 74-80.
- Dasgupta P., « The idea of sustainable development », *Sustainability Science*, vol. 2, n°1, 2007, p. 5-11.
- Declerck R., *When-clauses and temporal structures*, Routledge, London, 1997.
- El Hasnaoui A.R., *Le circonstant de manière*, Thèse de doctorat, Université Paris VI, 2008.
- Gosselin L., Les circonstanciels : de la phrase au texte, *Langue Française*, vol. 86, n°1, 1990, p. 37-45.
- Grenier J.Y., Grignon C., Menger P.M., *Le modèle et le récit*, Ed. de la Maison des sciences de l'homme, Paris, 2001.
- Guillaume G., *Leçons de linguistiques 1948-1949*, Presses de l'Université Laval, 1973.

- Hadermann P., *Etude morphosyntaxique du mot où*, Edition Duculot, Paris, 1993.
- Kerbrat-Orecchioni C., *Les actes de langage dans le discours*, Nathan, Paris, 2001.
- Klir G.J., Valach M., *Cybernetic modelling*, SNTL, Prague, 1965.
- Larousse, *Le petit Larousse Grand Format*, 2003.
- Larsen-Freeman D., Cameron L., *Complex Systems and Applied Linguistics*, Oxford University Press, 2008.
- Lazard G., *L'actance*, Paris, Presses Universitaires de France, 1994
- Le Moigne J.-L., *La modélisation des systèmes complexes*, 178 p., Dunod, 1999
- Martin P., *L'assemblage de programmes au sein de plateformes logicielles*, Editions Universitaires Européennes, 2010.
- Martin R., *Comprendre la linguistique*, Presses Universitaires de France, Paris 2002
- Maturana H.R., Varela F.J. *The tree of knowledge: The biological roots of human understanding*, Boston, Shambhala Publications, 1987.
- Mondy N., Corio-Costet M.F., The response of the grape berry moth (*Lobesia botrana*) to a dietary phytopathogenic fungus (*Botrytis cinerea*): the significance of fungus sterols, *Journal of Insect Physiology*, vol. 46, 2000, p. 1557-1564.
- Quesnel G., Duboz R., Ramat E., The Virtual Laboratory Environment, *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 17, n°4, 2009, p. 641-653.
- Risco-Martín J.L., de la Cruz J.M., Mittal S., Zeigler B.P., eUDEVS: Executable UML with DEVS Theory of Modeling and Simulation, *Simulation*, vol. 85, n°11, 2009, p. 750-777.
- Schreiber G., *Knowledge engineering*, p.929-946, In: Van Harmelen F., Lifschitz V., Porter B. (eds), *Handbook of Knowledge Representation*, Elsevier, 2008
- Tesnière L., *Eléments de syntaxe structurale*, Ed. Klincksieck, Paris, 1988.
- TLFi, *Trésor de la Langue Française informatisé* - 1971-1994, <http://atilf.atilf.fr/>, 2009.
- Zeigler B.P., Praehofer H., Kim T.G. *Theory of Modeling and Simulation*, Academic Press (2nd ed.), 2000.